第 30 卷 第 4 期 力学进展 Vol.30 No.4
2000 年 11 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS Nov. 25, 2000

结构元件疲劳断裂可靠性估算方法*

吕海波 姚卫星

南京航空航天大学飞行器系，南京 210016

摘 要 对近年来国内外在元件疲劳断裂可靠性估算方法方面所做的研究作了系统的回顾和讨论，按安全裕量方程将其分为三类：裂纹长度模型、疲劳寿命模型和断裂强度模型，并对这三种模型的特点及局限性作了分析论述，对元件疲劳可靠性分析的发展趋势作了讨论.

关键词 疲劳断裂可靠性，安全裕量方程，裂纹长度，疲劳寿命，断裂强度

1 引 言

随着科学和工艺技术的迅速进步，各种工程结构大型化、复杂化是其发展方向之一，其工作环境越来越复杂，操作条件越来越恶劣，疲劳断裂失效成为其主要失效模式. 由于疲劳裂纹扩展受到材料微观结构的不均匀性等内在分散性和载荷历程、构件几何特性、工作环境等外在分散性等许多不确定性因素的影响，因此疲劳裂纹扩展行为也表现出很强的随机性，用以往工程中采用的确定性方法进行分析将带来很大的误差，因此有必要引入概率统计理论，对工程结构和元件进行疲劳断裂可靠性分析. 目前有的学者已在这方面作了初步的研究，提出了若干分析模型. 疲劳断裂可靠性分析对工程应用有着很重要的意义.

目前国内外在元件疲劳断裂可靠性分析方法问题上所作的研究，按其安全裕量方程 (状态方程) 分，主要有以下几种模型： (1) 裂纹长度模型，该模型在研究裂纹随机扩展的基础上，以裂纹长度为判据对结构元件的安全与可靠性加以分析； (2) 疲劳寿命模型，通过对疲劳寿命和疲劳损伤规律的研究，以疲劳寿命作为可靠性分析的参数； (3) 断裂强度模型，该模型以应力 - 强度干涉模型为基础，通过对断裂强度在疲劳载荷下随时间变化规律的研究，从而求出其寿命参数. 本文将对各种模型进行较为系统的阐述，并作简要的评述.

2 裂纹长度模型

结构元件在疲劳载荷作用下，其内部的累积损伤不断增加，这是一个不可逆的能量耗散过程. 随着循环次数的增加，元件中的疲劳裂纹也不断扩展，其行为表现出很大的随机性. 如果以疲劳裂纹长度 $a(n)$ 作为控制参数，其安全裕量方程基本形式为

$$M_a = a(n) - a_c \le 0 \tag{1}$$

收稿日期：1999-03-08, 修回日期：1999-11-03

*江苏省自然科学基金资助项目 (BE97062)

式中，$a(n)$ 为疲劳裂纹长度，是循环数 n 的广义单调增函数，a_c 为临界裂纹长度，当上式满足时，元件不发生疲劳破坏，即元件的断裂可靠度为

$$R_e = P\{M_a < 0\} \tag{2}$$

在分析中对临界裂纹长度 a_c 有两种处理方法，一是将其视为常数，一是随机变量，再针对常幅或变幅载荷进行分析．而对 $a(n)$ 则可用裂纹扩展特性来描述．该模型可用图 1 解释．

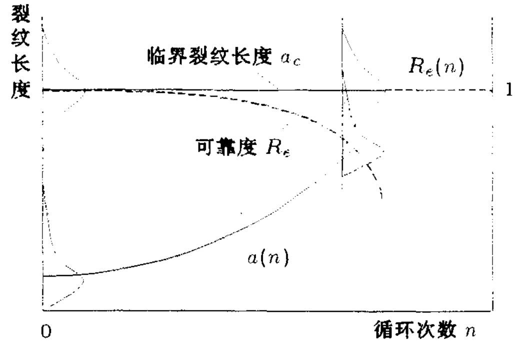

图 1 裂纹长度模型

由于疲劳裂纹扩展行为常表现出较强的不确定性，因而考虑各种不定因素影响的随机疲劳裂纹扩展分析方法也受到了人们的广泛重视，提出了很多随机裂纹扩展模型．疲劳裂纹扩展特性通常可用 $\mathrm{d}a/\mathrm{d}N = L(\Delta K, K_{\max}, R, S, a, \cdots)$ 描述，目前工程上采用最多的是 Paris 公式

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}N} = C(\Delta K)^M \tag{3}$$

在随机模型中，C 和 M 是随机变量，对其随机特性已有很多研究 [1]，结论为：C 和 M 统计相关；C 服从正态分布；M 服从对数正态分布．J.N. Yang 等 [2,3] 将裂纹扩展过程看作一平稳正态过程，在 $\mathrm{d}a/\mathrm{d}N = Q[a(t)]^b$ 的假设下给出了不同情况下的解析解．Bogdanoff 等 [4,5] 将疲劳裂纹扩展累积损伤定义为整个寿命区内的不可逆过程，用马尔可夫链来模拟该过程，认为裂纹扩展是独立的、不可逆的、无后效性的随机离散马尔可夫链．若考虑载荷的分散性对疲劳裂纹随机扩展的影响，则有迟滞模型 [6] 和 R. Arone 的随机加载模型 [7] 等．而 K. Sobczyk 等 [8] 则发展了同时考虑材料分散性和随机载荷分散性的综合模型，运用随机微分方程可求出其 Stratonovich 解．

在此基础上，许多学者进一步提出了各种疲劳可靠性分析和评估方法．Madsen[9] 在 Paris 公式基础上进一步用下式反映在常幅载荷作用下从裂纹长度 a_1 到 a_2 的累积损伤

$$\Psi(a_2, a_1) = \int_{a_1}^{a_2} \frac{\mathrm{d}a}{[F(a, \boldsymbol{Y})\sqrt{\pi a}]^M} \tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{Y}$ 为随机矢量，如应力集中系数、尺寸系数等，a 为裂纹尺寸．Madsen 认为虽然实际结构往往受到变幅载荷作用，但考虑到桥梁结构的特点，将变幅载荷等效为一平均应力是合适的．采用循环续循环的计算方法可对上式进行求解．

Zhao Zhengwei 等 [10] 利用 Madsen 的结论，认为既然 $\Psi(a_2, a_1)$ 是随裂纹长度 a 单调增加的，则可用下式代替 (1) 式作为疲劳破坏的判据

$$\Psi(a_c, a_0) - \Psi(a_N, a_0) > 0 \tag{5}$$

当上式满足时，元件不发生疲劳破坏．Zhao 利用该式对一钢桥结构进行了疲劳可靠性分析，并与基于累积损伤的疲劳可靠性计算方法作了比较，两种方法的分析结果基本上是相同的，但该方法不仅具有和后者同样简单实用的特点，而且在实际维修和检测中更为有效．Zhao 在文献 [11] 中应用该方法对钢桥在维修中的各种情况进行了可靠性分析，并根据结果决定相应的维修方案．

Sheikh[12] 在 1995 年所做的研究中，在大量试验基础上提出了一新的裂纹扩展统计模型

$$a(n) = a_0 n^{\beta} \tag{6}$$

式中 $a_0 = a(1)$ 和 β 都是统计参数. Sheikh 假设 β 服从正态分布，并用裂纹长度模型给出了常幅载荷下元件可靠性的表达式

$$R(n) = \Phi\left[\frac{\ln a_c - E[\ln a(n)]}{\sqrt{\mathrm{Var}\,[\ln a(n)]}}\right] \tag{7}$$

式中

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{z} \mathrm{e}^{-z^2/2}\mathrm{d}z \tag{8}$$

$$E[\ln a(n)] = \ln a_0 + (\ln n)E(\beta) \tag{9}$$

$$\mathrm{Var}\,[\ln a(n)] = (\ln n)^2 \mathrm{Var}\,(\beta) \tag{10}$$

Sheikh 用上式求出不同载荷水平下的计算结果，说明疲劳裂纹的扩展是一随机非线性过程，与 Paris 公式相比，结果更令人满意，当 $\beta - 1 = M/2$ 时， Paris 公式就是该模型的一个特例.

在国内，邹小理等 [13] 将疲劳裂纹扩展的一般形式方程随机化，将其写为

$$\frac{\mathrm{d}a(t)}{\mathrm{d}t} = F(\Delta K, K_{\max}, a, R, \cdots)X(t,\gamma) \tag{11}$$

式中 $X(t,\gamma)$ 为非负的平稳随机过程. 进一步将疲劳裂纹扩展近似为扩散过程，采用本征函数法求解相应的向后 Fokker-Plank 方程，并将临界裂纹长度 a_c 看作是固定值，在裂纹长度模型的基础上给出了常幅载荷下疲劳裂纹扩展寿命分布的解析解. 该方法所需试验数据较少，在目前重复性疲劳扩展试验数据缺乏的情况下有较重要的意义. 此外刘建中、徐灏等 [14] 也在这方面做了一定的研究，运用随机点过程理论，导出求取裂纹扩展随机过程低阶矩的公式，并采用二次矩近似方法得到了疲劳裂纹给定寿命下扩展的超值概率分布及指定裂纹长度下的随机扩展寿命分布的预测公式.

由上述方法可见，裂纹长度模型的关键在于选取恰当的裂纹扩展随机模型，该模型较为直观，对于实际维修有着直接的意义，但在应用中有时会存在裂纹检测上的困难. 目前国内外学者所作的工作大多集中在常幅载荷下，对于变幅载荷下断裂可靠性的计算仍存在很大困难，主要是裂纹扩展特性不易求得. 该模型的重点在于需要选取一种合适的裂纹扩展随机模型.

3 疲劳寿命模型

疲劳寿命模型是以疲劳寿命作为参数，结合疲劳累积损伤或裂纹扩展理论来进行疲劳可靠性分析的，其状态方程为

$$M = T - T_0 \geq 0 \tag{12}$$

式中， T_0 是设计寿命，为定值；而 T 为在一给定载荷谱下的疲劳寿命. 在常幅载荷下，疲劳寿命可用对数正态或 Weibull 分布描述. (12) 式所描述的模型可粗略地用图 2 解释. 该模型简便直观，便于进行可靠性设计.

Tanaka 和 Mura[15] 曾提出过以下微观裂纹成核模型

$$N_n = \frac{W_s d^3 \pi(1-\nu)}{\Delta\gamma^2 G} \tag{13}$$

式中， N_n 为裂纹成核循环数， $\Delta\gamma$ 为塑性应变增量， d 是晶粒直径，以上参数都可视为随机变量， G 为体积剪切模量， W_s 为断裂能， ν 为体积泊松比，是定值. Tanaka 等求出 $\Delta\gamma = \dfrac{1}{G}(\Delta\tau - 2k)d^2\pi(1-\nu)$. N_n 的分布可由以上各参数的分布求得. Tryon 和 Cruse[16] 利用此模型进行了常幅载荷下疲劳可靠性分析，他们将载荷视为正态分布，对 NiCrMoV 钢进行计算，并与试验数据加以对比，还对晶粒直径的影响做了敏感性分析. 他们的工作对微观结构下疲劳可靠性分析走出了一大步.

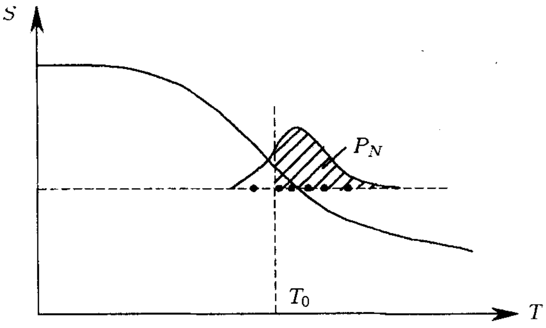

图 2 疲劳寿命模型

1992 年， Karamchandani[17] 为克服 Monte Carlo 法和直接积分法因巨大的计算量造成的限制，提出了用一阶可靠性方法或二阶可靠性方法计算失效途径失效概率的格式. 他用断裂力学方法从裂纹扩展的角度计算疲劳损伤，给出疲劳寿命为

$$T = \frac{R_{\rm sec}R_{\rm ahs}}{C\varepsilon_F^m\varepsilon_S^m\varepsilon_{SCF}^m\Omega}\int_{a_0}^{t}\frac{{\rm d}a}{\varepsilon_Y^mY(a)^m(\pi a)^{m/2}} \tag{14}$$

式中， C,m 为 Paris 公式 ${\rm d}a/{\rm d}n = C(\Delta K)^m$ 中的参数， a_0 为初始裂纹深度， t 为管节点壁厚， $R_{\rm sec}, R_{\rm ahs}, \varepsilon_F, \varepsilon_S, \varepsilon_{SCF}, \varepsilon_Y$ 为代表裂纹扩展各阶段计算中不确定性的随机变量， Ω 为应力参数. 在此基础上可得失效途径的失效概率为

$$P_f = \left[\bigcap_{i=1,n}(T_{i/1,2,\cdots,i-1} \le T_0)\right] \tag{15}$$

其中， $T_{i/1,2,\cdots,i-1}$ 为在单元 $1,2,\cdots,i-1$ 破坏后，单元 i 的失效概率.

Karamchandani 提出的这一方法计算简便有效，使得结构系统疲劳可靠性分析的实际应用迈出了一大步，而且由于一阶或二阶可靠性方法的应用而使随机变量的分布形式没有限制，可以适用于更多类型的结构以及各种概率分布的载荷. 但 (15) 式的定义不够完善，仍有需要加以改进的地方，而且其有关失效途径之间强烈相关的结论也值得进一步讨论. 胡毓仁、陈伯真 [18] 在对 Karamchandani 的成果进行深入研究后认为，失效途径的疲劳失效概率应更准确地用下式计算

$$P_f = P[(T_1 < T_2)\cap(T_{2/1} < T_{3/1})\cap(T_{3/1,2} < T_{4/1,2})\cap\cdots\cap(T_{n/1,2,\cdots,n-1} < T_0)] \tag{16}$$

上式仍可用一阶或二阶可靠性方法求出.

Kam 和 Birkinshaw[19] 则将整个疲劳寿命分为裂纹萌生 N_I 和裂纹扩展 N_{CG} 两个阶段，建立起管节点的疲劳可靠性分析模型，并简单考虑了无损检测对疲劳可靠性设计的影响. 但该方法需要大量的实际数据，在确定裂纹萌生和裂纹扩展界限等方面还有很多值得进一步研究的地方.

在国内，丁克勤、柳春图 [20] 在研究管节点的疲劳可靠性时在 Paris 公式基础上推出了在随机载荷作用下管节点疲劳断裂寿命的表达式

$$N_f = \frac{a_c^{1-m/2} - a_0^{1-m/2}}{CY^mB^m(\Delta\sigma_m)^m(\ln N_T)^{-m/\nu}\Gamma(1+m/\nu)\pi^{m/2}(1-m/2)} \tag{17}$$

式中 N_T 为设计寿命，其它参数参见文献 [20]. 上式是在假设随机载荷服从威布尔分布并将其折算为当量应力的基础上得到的，因而该方法适用于常幅载荷作用下断裂可靠性计算．他们进一步用疲劳寿命模型和重要性抽样法对管节点的疲劳失效概率进行了计算.

从上面的叙述可以看出，疲劳寿命模型的分析较为简单，但一般需要 Monte-Carlo 法或直接积分法等求得，存在着计算工作量大的问题．而且元件的疲劳可靠性模型中各随机变量的统计特性对疲劳寿命有着显著的影响，因而长期积累和掌握各种不确定因素的统计数据资料是一项十分重要的工作．在常幅载荷作用下，元件的疲劳可靠度比较容易得到，但在随机和变幅载荷作用下，寿命的分布不易求得．所以应用该模型有一定的困难.

4 断裂强度模型

在疲劳载荷作用下，材料内部的损伤不断增加，裂纹不断扩展，性能不断恶化，导致材料抵抗外载荷的能力下降．这可用断裂强度来描述．其安全裕量方程为

$$M_R = R(n) - S(n) \geq 0 \tag{18}$$

在此方法中如何对断裂强度 $R(n)$ 进行正确地描述是关键.

断裂强度是指元件在使用一段时间后，该元件还具有的抵抗疲劳断裂的能力．它不仅与载荷的循环数 n 有关，而且还与加载的应力水平有关，即

$$R(n) = f(n, S) \tag{19}$$

断裂强度模型是建立在应力 - 强度干涉模型基础上的，如图 3. 应力 - 强度干涉模型 [21] 是经典可靠性理论的基本分析方法：若元件强度 R 和元件所承受的载荷 S 相互统计独立，其概率密度函数分别为 $f_R(R)$ 和 $f_S(S)$, 则元件可靠度为

$$Re = P\{R - S \geq 0\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_S^{+\infty} f_R(R)\mathrm{d}R\right] f_S(S)\mathrm{d}S \tag{20}$$

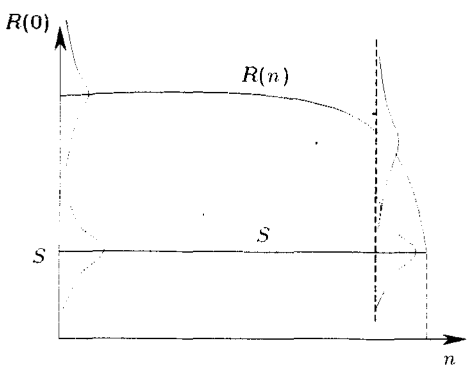

图 3 断裂强度模型

可用于描述元件断裂强度的指标有很多，如剩余强度 R 、应力强度因子 K_I 、裂纹尖端能量释放率 G_I 、裂纹张开位移 COD 、延性断裂韧度 J 等．尽管各个断裂强度的表达式不同，但其物理意义都是表示材料抵抗裂纹扩展的能力．可以证明 [22]: 在线弹性和小范围屈服的条件下，K_I, G_I, J_I, COD 等断裂判据完全等效，在大范围屈服时， J_I 和 COD 判据仍然有效．许多学者曾采用各种断裂判据对元件的疲劳断裂可靠性进行了研究．曾珊、凌树森 [23] 在 Griffith-Irwin 公式和 Paris 公式的基础上推出剩余强度的表达式

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}N} = -\gamma\left(\frac{1}{R}\right)^{m-3} \tag{21}$$

式中 $\gamma = (K_c\alpha)^{m-2}\beta/2$, K_c 为材料的断裂韧性， β 为应力幅的函数， α, m 为材料常数．对于一般金属材料 $m \geq 2$, 对上式积分即可得疲劳剩余强度．此外进一步对连杆进行常幅载荷下疲劳

可靠性分析，并与试验进行了对比. 但他没有对变幅载荷下断裂可靠性的求解展开进一步的分析.

郭书祥等 [24,25] 采用应力强度因子 K_I 建立起疲劳可靠性分析的安全裕量方程，并将其转化为用剩余强度表达的等价形式，其剩余强度形式为

$$R(n)=\frac{K_{IC}}{\beta(a)\sqrt{\pi a(t)}} \tag{22}$$

并假设剩余强度为服从正态分布的非平稳随机过程. 该模型根据超限的马尔可夫假设，对裂纹扩展所引起的强度衰减结构进行了动态可靠性分析. 郭书祥等进一步研究了随机变幅载荷下裂纹扩展情况，在不考虑载荷效应情况下给出了第 i 次载荷下的裂纹增量表达式

$$\Delta a_i = C_0 K_0^{-m}\beta^m(a_i)\Delta S_i^m(\sqrt{\pi a_i})^m \tag{23}$$

式中 C_0 为材料常数， ΔS_i 为第 i 次载荷循环的应力幅值， ΔS_i 为第 i 次载荷循环所引起的裂纹扩展增量，并在假设结构所受的应力过程为高斯平稳窄带过程的基础上进行了可靠性分析和寿命估计. 但该方法没有考虑载荷效应的影响，应加以进一步的改进.

欧进萍等 [26] 在 (22) 式基础上进一步讨论了 I–III 复合型裂纹的剩余强度形式，提出可用一等效的临界断裂韧性 K_{ICeq} 来代替 (22) 中的 K_I

$$K_{ICeq}=\frac{K_{IC}}{\sqrt{1+\frac{1}{1-\gamma}\left(\frac{\beta_3(a)}{\beta_1(a)}\frac{F_3}{F_1}\frac{G_1(a)}{G_3(a)}\right)^2}} \tag{24}$$

式中 γ 为材料泊松比， F_1,F_3 为使裂纹向 I 型裂纹和 III 型裂纹扩展的力， G 为截面模量. 欧进萍等在综合考虑载荷随机性、裂纹扩展随机性基础上，导出了裂纹扩展尺寸和剩余强度的统计矩计算公式，其计算简便，但其中有关剩余强度服从正态分布的假设值得进一步考虑.

刘长虹等 [27] 以 COD 为指标建立了球罐的疲劳可靠性分析模型，当不考虑塑性失稳时，认为疲劳裂纹扩展到壁厚时失效，在 Paris 公式和 JWES-2805 规范基础上给出以下安全裕量方程:

$$M_\delta=\delta_c-\delta=\delta_c-3.5\sigma_m(1+K_R+K_W)a_0/E[1-C(1+K_R+K_W)^4\Delta\sigma^4\pi^2Na_0]\geq 0 \tag{25}$$

式中 σ_m 为膜应力， E 为弹性模量， a_0 为裂纹深度， δ 和 δ_c 分别为 COD 和临界 COD 值， K_R,K_W 分别为由错口量和角变形引起的应力集中系数，其均视为随机变量. 刘长虹等还运用模糊理论考虑了探伤和操作中的人为失误. 在该方法中只考虑了常幅载荷作用情况，没有对变幅载荷作进一步分析. 丁克勤、柳春图 [28] 也运用 COD 为判据对接管的断裂失效概率进行了分析.

熊峻江、高镇同等 [29] 提出了如下的二维断裂可靠性干涉模型

$$Re=1-\iint_{(\Delta K,K_m)\in\Psi}P(\Delta K,K_m)g(\Delta K,K_m)\mid t)\mathrm{d}(\Delta K)\mathrm{d}(K_m) \tag{26}$$

式中， P 为破坏率的分布函数， g 为 $(\Delta K,K_m)$ 的二维概率密度函数. 该模型已被用于多种机型的疲劳可靠性分析中.

此外，徐人平等 [30] 还建立了以应变为判据指标的动态应变 - 强度可靠性模型，该文的分析是基于 P-ε-N 曲线的. 由于采用应变作为判据可以考虑残余应力对疲劳性能的影响和载荷的

顺序效应，因而也具有一定的应用前景. 在该文中仅对材料常幅应变下的可靠性进行了讨论，还有待于做更深入的研究.

从以上论述可以知道，由于断裂强度模型的准则是天然的，因此用断裂强度估算元件的可靠性具有实用价值且切实可行，而且可以用于描述元件断裂强度的指标各式各样，因此在这方面的研究必然会成为热点. 当然不同的判据其适用范围也是不同的，而且由于更深层次的分析需要大量试验结果的支持，这也给断裂强度模型的研究带来了困难.

5 结束语

由于疲劳断裂可靠性的研究对工程应用有着非常重要的意义，因此这方面的研究目前正逐步成为热点. 以上所论述的是从疲劳断裂可靠性分析模型的角度对目前国内外学者所作的工作进行的大致分类和总结，并分别作了简单的阐述. 这三种模型各有特点：

(1) 裂纹长度模型较直观，该模型的应用对于工程结构的维修策略有直接的现实意义. 如何选取恰当的裂纹扩展随机模型对分析比较重要；

(2) 疲劳寿命模型比较简单，便于进行疲劳可靠性设计，在常幅载荷作用下，元件的疲劳可靠度比较容易得到，但在随机载荷作用下，寿命的分布不易求得，因而在随机载荷下其应用较为困难.

(3) 断裂强度模型采用了应力 - 强度干涉模型，能正确反映疲劳强度退化现象. 但目前试验数据不够充分，给分析带来困难.

总之，疲劳断裂可靠性的研究有着重要的工程意义，在这方面仍需进行大量的试验和微观机理上的研究.

参 考 文 献

1 姚卫星，杨晓华. 疲劳裂纹随机扩展模型进展. 力学与实践，1995, 17(3): 1~7

2 Yang J N, Salivan G C, Annis C G. Statistical modeling of fatigue crack growth in a nical-based super alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, 18: 257~270

3 Yang J N, et al. Stochastic Crack Propagation in Fastener Holes. AIAA Paper No. 85-0666, 1985. 225~233

4 Bogdanoff J L. A new cumulative damage model part I. *Journal of Applied Mechanics*, 1987, 45: 246~250

5 Kozin F, Bogdanoff J L. Probabilistic models of fatigue crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*, 1984, 20: 255~270

6 航空工业部科学技术委员会编. 飞机结构损伤容限设计指南. 北京：航空工业出版社，1985

7 Arone R. Fatigue crack growth under stationary random load. *Engineering Fracture Mechanics*, 1991, 39: 895~903

8 Sobczyk K, Trebicki J. Modeling of random by cumulative jump processes. *Engineering Fracture Mechanics*, 1989, 34: 477~493

9 Madsen H O. Random fatigue crack growth and inspection. In: Proc ICOSSAR'85, Kobe, Japan, 1985. I475-I484

10 Zhao Zhengwei, Achintya Haldar, Florence L Breen Jr. Fatigue-reliability evaluation of steel bridges. *J Structural Engineering, ASCE*, 1994, 120(5): 1608~1623

11 Zhao Zhengwei, Achintya Haldar, Florence L Breen Jr. Fatigue-reliability updating through inspections of steel bridges. *J Structural Engineering, ASCE*, 1994, 120(5): 1624~1642

12 Sheikh A K, Younze M. A reliability model for fatigue life characterization. *Int J Fatigue*, 1995, 17(2): 121~128

13 邹小理，樊蔚勋，刘英卫. 疲劳裂纹扩展寿命的随机模型. 固体力学学报，1997, 18(2): 167~171

14 刘建中，谢里阳，徐灏. 基于随机点过程理论的疲劳裂纹随机扩展模型. 固体力学学报，1995, 16(3): 259~263

15 Tanaka K, Mura T. A dislocation model for fatigue crack initiation. *J App Mech, ASME*, 1981, 48: 97~103

16 Tryon R G, Cruse T A. A reliability-based model to predict scatter in fatigue crack nucleation life. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1998, 21: 257~267

17 Karamchandani A, Dalane J I, Bjerager P. Systems reliability approach to fatigue of structures. *J Structural Engineering, ASCE*, 1992, 118(3): 684~700

18 胡毓仁，陈伯真. 海洋平台结构系统疲劳可靠性分析的一阶二次矩方法. 中国造船，1994, 4: 88~102

19 Kam J C P, Birkinshaw M. Reliability-based fatigue and fracture mechanics assessment methodology for offshore structural components. *Fatigue*, 1994, 16: 183～191
20 丁克勤，柳春图．重要性抽样法在管节点疲劳可靠性分析中的应用．力学学报， 1996, 28(3): 359～362
21 姚卫星，顾怡．结构可靠性设计．北京：航空工业出版社， 1997. 50～65
22 徐人平，段小建，李淑兰．断裂韧性可靠性分析的相似计算法．强度与环境， 1996, 4: 21～27
23 曾珊，凌树林．疲劳剩余强度的可靠性研究．力学学报， 1998, 30(2): 220～228
24 郭书祥．疲劳裂纹扩展随机模型和动态可靠性．机械强度， 1998, 20(2): 120～125
25 殷学纲，郭书祥．含初始裂纹结构的动态可靠性分析．工程力学， 1995, 12(2): 72～79
26 欧进萍，段忠东．基于随机裂纹扩展机制的构件抗力衰减分析．机械强度， 1994, 16(3): 46～51
27 刘长虹，吕震宙，郑长卿．用重要抽样法求解球罐模糊断裂失效概率的方法．机械设计， 1998, 3: 30～32
28 丁克勤，柳春图．接管断裂失效概率估算的一种新方法．机械强度， 1996, 18(4): 43～46
29 熊峻江，高镇同，干伟民，孙如林．稳态循环应力下结构断裂可靠性设计方法．固体力学学报， 1996, 17(3): 235～237
30 徐人平，李淑兰，段小建．随时间变化的应变疲劳可靠性模型．强度与环境， 1996, 3: 8～14

A REVIEW OF THE EVALUATION METHODS OF FATIGUE FRACTURE RELIABILITY OF STRUCTURAL ELEMENTS

Lü Haibo   Yao Weixing

Department of Aircraft Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract A detailed review of the evaluation methods of fracture reliability of structural elements under cyclic loading has been made, and based on it, some discussions have been done. All the models for the fracture reliability evaluation are classified into three types according to the status equations, that is, crack length model, fatigue life model and fracture strength model. Every model can find its own position in the engineering application, and with some limits. Some discussions on the further development of the evaluation of fracture reliability are made.

Keywords fatigue fracture reliability, status equation, crack length, fatigue life, fracture strength